

空间激光通信中四象限光电探测器环形光斑检测及误差补偿

李生民^{1,2}, 张圆清^{1,2*}

¹陕西省复杂系统控制与智能信息处理重点实验室, 陕西 西安 710048;

²西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 分析了以卡塞格林(卡式)望远系统作为光学天线时,大气激光通信捕获、对准和跟踪系统中四象限光电探测器光敏面上环形光斑位置检测的误差问题。基于光斑中心遮挡与死区感应光能量的等效效应,理论推导了入射环形光斑偏移量与光斑中心坐标、探测器死区宽度和环形光斑内外圆半径之间关系的数学模型。数值仿真和实验结果表明:与完整高斯光斑相比,环形光斑的探测线性范围较小,检测灵敏度较低。根据实验条件选择合适的卡式光学天线或光斑半径,使遮光比为 30%时探测器的探测线性范围最大,不会出现非线性误差。所提环形光斑误差补偿算法克服了光斑中心遮挡带来的位置检测误差,探测器探测精度可达 0.0015 mm。

关键词 光通信; 捕获、对准和跟踪系统; 环形光斑检测; 环形光斑误差补偿算法; 四象限光电探测器

中图分类号 TN929.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.1106005

Annular Facula Detection and Error Compensation of Four-Quadrant Photoelectric Detector in Space Laser Communication

Li Shengmin^{1,2}, Zhang Yuanqing^{1,2}

¹Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

²School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract When a Cassegrain telescope system is taken as optical antenna, the error of annular facula position detection on the photosensitive surface of four-quadrant photoelectric detector in acquisition, pointing and tracking system for atmospheric laser communication is analyzed. Based on the equivalent effects of the facula center shelter and dead zone induction light energy, mathematical models of relationships among facula center coordinate, dead zone width of detector, inner and outer circle radii of annular facula and incident annular facula offset are theoretically deduced. Numerical simulation and experimental results show that the detection linear range of annular spot is smaller than that of complete Gauss facula, and the detection sensitivity is lower. The appropriate Cassegrain optical antenna and facula radius are selected according to the experimental conditions, so that the detection linear range of detector is the largest when the shading ratio is 30%, and nonlinear error will not occur. An annular facula error compensation algorithm is proposed to overcome the position detection error caused by the facula center shelter, and the detection accuracy of the detector can reach 0.0015 mm.

Key words optical communications; acquisition, pointing and tracking systems; annular facula detection; annular facula error compensation algorithm; four-quadrant photoelectric detector

OCIS codes 060.2605; 200.2605; 040.5160; 120.1880

收稿日期: 2017-06-15; 收到修改稿日期: 2017-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(51607142)、陕西省自然科学基金项目(2016JM5061)、西安市科技计划[CXY1509(1)]、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)

作者简介: 李生民(1962—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事检测与智能系统控制方面的研究。

E-mail: Lsm707@xaut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: 861792676@qq.com

1 引 言

大气激光通信中卡塞格林(卡式)光学天线的应用最为广泛,它具有无色差、结构紧凑、口径大、焦距长等实用优势^[1-4]。利用卡式光学天线接收对方光端机的发射光,在捕获、对准与跟踪(APT)系统中使用四象限光电探测器(QD)对入射光斑进行位置信息检测^[5-8],进而调节伺服系统,建立并维持通信链路。QD 是高灵敏度器件,因此分析入射光斑的各种特性和探测器自身结构的特点对提高探测器的工作性能有重要意义。

2010 年 Lee 等^[6]研究了高斯光斑尺寸对象限探测器位移检测灵敏度的影响,研究表明位移检测灵敏度随高斯光斑宽度的减小而增大。2012 年张雷等^[9]分析了光斑大小、探测器噪声以及放大器噪声对 QD 跟踪精度的影响。同年, Schmidt 等^[10]将 QD 作为数字信号处理(DSP)软件中实现比例-积分-微分(PID)控制器的反馈传感器,实现闭环回路控制。2013 年杨桂栓等^[11]分析了死区对探测范围及灵敏度的影响,研究表明:死区宽度相对于光斑半径的比例越大,光斑偏移量随光斑中心的变化趋势越陡峭,检测灵敏度越高。2014 年马晓军等^[12]研究了空间激光通信中卡式光学天线副镜遮挡对天线增益及天线传输效率的影响,研究表明两者均随副镜遮挡面积的增加而减小。2015 年张辉等^[13]研究了高斯光斑模型下影响 QD 检测精度的主要因素,研究表明选取较小半径的光斑、靠近光敏面中心和提高信噪比可以提高位置检测的精度。2016 年柯熙政等^[14]提出了基于背投幕的光束对准检测方法,利用 CCD 相机检测环形光斑的位置,解决了传统方法无法分辨光束漂移及检测系统天线偏差角的问题,并且该课题组于 2017 年使用 QD 解决了光束漂移带来的光斑残缺问题^[15]。以上研究中,定位算法多采用完整的均匀光斑或高斯光斑,未考虑 QD 自身结构中死区的影响,而考虑死区影响时未结合 APT 系统的实际问题。文献[11]基于 CCD 相机对环形光斑位置进行检测,文献[12]基于 QD 仅解决了空间激光通信中的光束漂移问题。已有较多关于环形光斑及光学天线遮光比对环状光束扩展、光斑形态、天线增益和天线传输效率等影响的研究,并以此为依据对光学天线系统进行改进。未见解决存在天线偏差角时使用 QD 对环形光斑进行位置检测时存在的检测误差问题的研究,也未见从选择合适遮光比的角度研究如何使 QD 获得最优探测线性范围的研究。

本文结合卡式光学天线副镜遮挡问题,详细推导了 QD 死区存在的情况下环形光斑位置偏移的数学模型。分析了与完整光斑相比,环形光斑对探测器探测线性范围和检测灵敏度的影响,以及在不同遮光比下接收端 QD 对环形光斑探测线性范围的影响。在克服光束漂移误差之后,用环形光斑误差补偿算法来补偿探测器探测线性范围内光斑中心遮挡带来的检测误差,并通过调节伺服系统使光斑位于探测器中心。

2 基本原理

2.1 环形光斑及其检测问题

QD 的工作原理如图 1 所示, QD 由 4 个相同的光电二极管集成在以四象限(A、B、C 和 D)形式分布的芯片上,当光斑落在探测器的光敏面上时,四象限就会根据所接收光能量的大小转换为 4 路光电流信号。为了避免四象限间信号相互干扰,制造时对光敏面进行分割,产生互相垂直的象限间隔,称为死区。死区不会将接收到的光能量转换为光电流,而光斑是连续的,这样就会造成接收光能量的损失。死区宽度相对于光敏面而言非常狭窄,但也会影响探测器的探测精度^[11]。

传统算法认为落在探测器光敏面上的激光光斑等效为能量分布均匀且半径为 r 的圆柱,因此各个象限转换的光电流 I_n 与光斑落在探测器光敏面上的面积 S_n 成比例^[16]。探测器输出微弱的电流信号,需要后端处理电路进行电流/电压转换及放大去噪处理,即

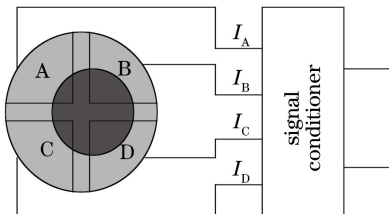


图 1 QD 工作原理图
Fig. 1 Working principle of QD

$$U_n \propto I_n \propto S_n, \quad (1)$$

式中 n 代表 A、B、C、D 4 个象限, U_n 为转换后的电压值。偏移量计算公式为^[17]

$$\begin{cases} E_x = \frac{(S_A + S_D) - (S_B + S_C)}{S_A + S_B + S_C + S_D} = \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ E_y = \frac{(S_A + S_B) - (S_C + S_D)}{S_A + S_B + S_C + S_D} = \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 E_x 、 E_y 分别为光斑中心在 X 轴、Y 轴上的偏移量。

在空间激光通信 APT 系统中,卡式光学天线的应用最为广泛。天线口径可以做的较大,远距离通信时可以尽可能多地接收光能量,而且焦距长,会聚的光束可以引出到主镜外,方便放置接收器和探测器;但是卡式天线自身结构中副镜的遮挡使得光斑中心缺失,形成环形光斑,如图 2 所示。

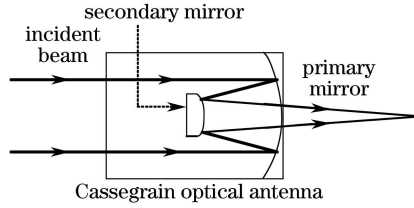


图 2 卡式光学天线系统结构示意图

Fig. 2 Structural schematic of Cassegrain optical antenna system

在实际应用中,探测器光敏面上的光斑不可能是均匀光斑,一般激光器发射的是能量呈高斯分布的光斑^[16]。如图 3(a)所示,光斑中心处能量最强,向外扩散则能量减弱,所以使用均匀光斑下的象限加减法会带来较大误差。若环形光斑中心处被遮挡,但距离光斑中心 r 处的光斑能量服从高斯分布,则可以用高斯分布函数描述,如图 3(b)所示。系统后端放置的 QD 是高精度器件,光斑中心遮挡与死区都会减少各个象限接收到的光能量,对探测器探测精度的影响不容忽视。为了与实际光束检测系统一致,需要分析死区存在情况下探测器对环形光斑的探测效果。

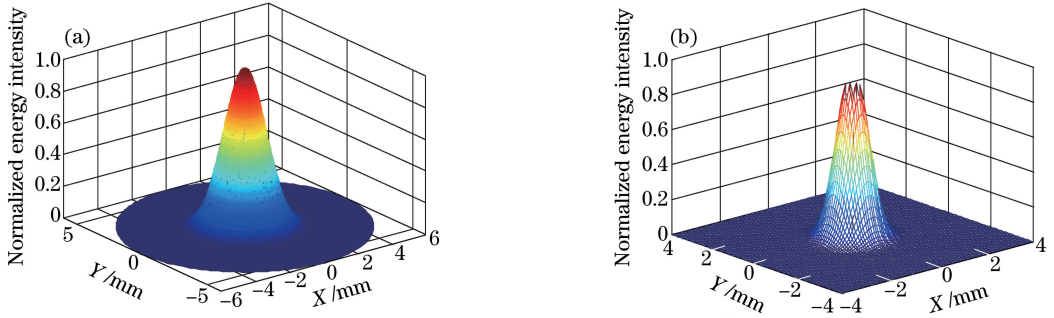


图 3 能量呈高斯分布的光斑模型。(a)完整圆形光斑;(b)环形光斑

Fig. 3 Models of facula with Gaussian distribution energy. (a) Complete circular facula; (b) annular facula

2.2 精跟踪系统中的光束对准检测

空间激光通信 APT 系统工作时,首先在不确定区域对发射端光束进行扫描捕获,使用 CCD 相机进行粗对准后,光束进入后端 QD 精跟踪检测视场^[18]。由于激光束的会聚性好、光束窄,在通信过程中要保持收发两端视轴的同轴性,需要对光束进行精确对准,精跟踪光束对准检测系统光路如图 4(a)所示。当通信距离不是很远时,QD 探测误差中的光束横向漂移使落在探测器光敏面上的光斑为残缺光斑,夹角误差使光斑偏离探测器中心位置,如图 4(b)、(c)所示。两种误差同时存在时,探测器失去偏移量检测能力。精跟踪系统对光束进行对准时需要得到完整环形光斑,而存在的天线视轴夹角需要由接收端探测器进行光斑中心位置偏移量探测,进而解算俯仰、方位角度,调节两轴伺服系统,使光斑位于探测器视场中心,且使收发双端视轴对准。

在克服收发双端夹角误差的过程中,利用探测器进行光斑中心位置偏移量的计算。与象限加减法相比,对角相减法具有更高的检测灵敏度,因此选取对角相减法,偏移量 x 、 y 的计算公式为^[19]

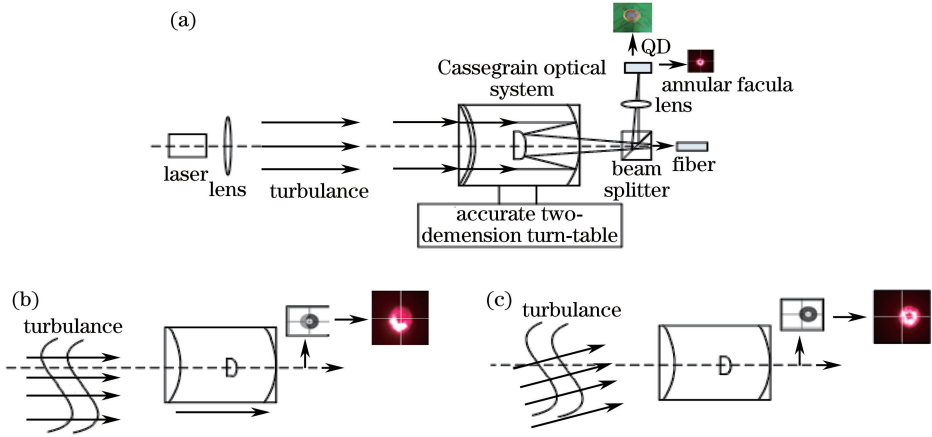


图 4 APT 系统结构示意图。(a)精跟踪光束对准检测系统;(b)光束横向漂移;(c)光束与接收天线视轴夹角误差
Fig. 4 Structural schematic of APT system. (a) Beam alignment detection system for fine tracking;
(b) beam transverse drift; (c) angle error of beam and receiving antenna boresight

$$\begin{cases} x = k \frac{I_A - I_C}{I_A + I_C} \\ y = k \frac{I_B - I_D}{I_B + I_D} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 k 为比例系数。假设在实验中接收到的光斑光强服从高斯分布,则光强分布函数为^[11]

$$I(r) = I_0 \exp(-2r^2/R), \quad (4)$$

式中 R 为光斑半径, I_0 为高斯光斑中心点光强。

各个象限光敏面接收到的全部光斑能量为

$$i_n = \nu \int_r S_n I(r) dr, \quad (5)$$

式中 i_n 为各个象限转换的光电流, ν 为转换因子。

3 环形光斑位置检测性能分析

3.1 数学模型推导

卡式天线作为光学天线时,完整光斑的中心区域被副镜遮挡,如图 5(a)所示。当通信距离较远时,接收到的光斑能量很微弱,认为中心被遮挡的区域与死区对光能量的感应效果相同,均导致接收光能量损失,称为死区等同效应。

当环形光斑偏离探测器中心时,偏向 X 轴正向的光斑中心能量缺失,导致接收到第一象限的光斑能量减少(探测器安装在相对象限加减法的直角坐标系顺时针旋转 45° 处),探测器位置解算产生误差,如图 5(b)所示。在实验室条件下,给定环形光斑在探测器上的偏移量为 0.14 mm 时,解算出实际位置 x ,由图 5(b)可见探测器的解算值存在明显误差,图中偏离较大的点可能是由外部电磁干扰等不确定因素引起的^[13]。

在 QD 死区条件下,分析卡式天线副镜中心遮挡下环形光斑对探测器的影响。假设不考虑其他内外部因素,环形光斑的外圆半径为 R_d ,内圆半径为 R_r , x 为光斑中心在 X 轴方向上的偏移量,死区宽度为 W , X' 为光斑中心坐标。探测器接收到的光强服从高斯分布,用光强分布函数 $I(r)$ 描述。 Y 轴方向与 X 轴方向的情况一致,只考虑光束与接收视场视轴存在夹角导致的光斑在 X 轴方向上的偏移,根据光斑的位置,可分为 4 种情况进行分析:

1) 如图 6(a)所示,环形光斑中心坐标 X' 位于对准跟踪允许的误差范围内,此时认为已经对准。

2) 当 $0 < |X'| < \sqrt{2}W/2$ 时,如图 6(b)所示,光斑中心位于死区内,但已经超出对准允许的误差范围,根据对角相减法,计算一、三象限接收到的有效光能量,将 QD 直角坐标转换到光斑极坐标,并对有效面积上的光能量进行积分,计算得到偏移量 x 为

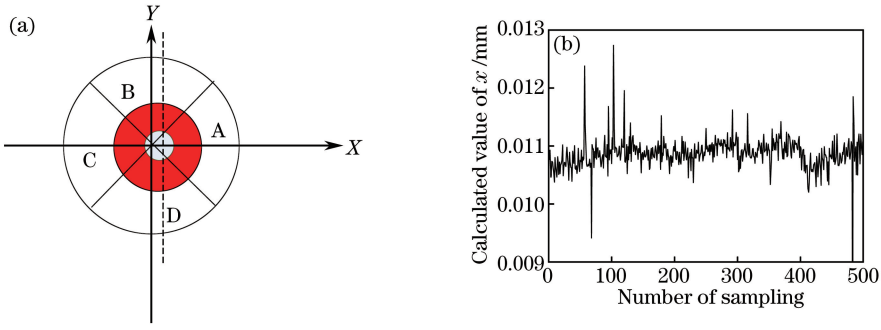

 图 5 (a) 环形光斑检测示意图; (b) (0.14, 0) 处的 x 解算值分布图

 Fig. 5 (a) Schematic of annular facula detection; (b) distribution of calculated values of x at (0.14, 0)

$$x = k \left[\int_{R_x}^{R_d} 2r \left(\arcsin \frac{W + \sqrt{2} X'}{2r} - \arcsin \frac{W - \sqrt{2} X'}{2r} \right) I(r) dr \right] \times \left[\int_{R_x}^{R_d} 2r \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{W - \sqrt{2} X'}{2r} \right) I(r) dr + \int_{R_x}^{R_d} 2r \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{W + \sqrt{2} X'}{2r} \right) I(r) dr \right]^{-1}. \quad (6)$$

3) 当 $\sqrt{2}W/2 < |X'| < R_x - \sqrt{2}W/2$ 时, 如图 6(c) 所示, 光斑中心不在死区内, 但光斑中心遮挡处完全偏离第三象限, 计算得到偏移量 x 为

$$x = k \left[\int_{R_x}^{R_d} 2r \left(\arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} + \arcsin \frac{W + \sqrt{2} X'}{2r} \right) I(r) dr \right] \times \left[\int_{R_x}^{R_d} 2r \left(\arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} + \arcsin \frac{W + \sqrt{2} X'}{2r} \right) I(r) dr + \int_{R_x}^{R_d} 4r \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{W + \sqrt{2} X'}{2r} \right) I(r) dr \right]^{-1}. \quad (7)$$

4) 当 $R_x - \sqrt{2}W/2 < |X'| < R_x + \sqrt{2}W/2$ 时, 如图 6(d) 所示, 光斑中心遮挡处完全偏离第三象限, 计算得到偏移量 x 为

$$x = k \left[\int_{R_x}^{\sqrt{2}W+X'} 2r \left(\frac{\pi}{4} + \arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} \right) I(r) dr + \int_{\sqrt{2}W+X'}^{R_d} 2r \left(\arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} + \arcsin \frac{\sqrt{2} X' + W}{2r} \right) I(r) dr \right] \times \left[\int_{R_x}^{\sqrt{2}W+X'} 2r \left(\frac{\pi}{4} + \arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} \right) I(r) dr + \int_{\sqrt{2}W+X'}^{R_d} 2r \left(\arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} + \arcsin \frac{\sqrt{2} X' + W}{2r} \right) I(r) dr + \int_{\sqrt{2}W+X'}^{R_d} 4r \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{\sqrt{2} X' + W}{2r} \right) I(r) dr \right]^{-1}. \quad (8)$$

当 $R_x + \sqrt{2}W/2 < |X'| < R_d - \sqrt{2}W/2$ 时, 如图 6(e) 所示, 光斑中心遮挡处偏离死区进入第一象限, 且光斑并未完全偏离第三象限, 计算得到偏移量 x 为

$$x = k \left[\int_{R_x}^{X' - \frac{\sqrt{2}W}{2}} r \left(2\pi - 4 \arccos \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} \right) I(r) dr + \int_{X' - \frac{\sqrt{2}W}{2}}^{X' + \frac{\sqrt{2}W}{2}} 2r \left(\frac{\pi}{4} + \arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} \right) I(r) dr + \int_{X' + \frac{\sqrt{2}W}{2}}^{R_d} 2r \left(\arcsin \frac{\sqrt{2} X' + W}{2r} + \arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} \right) I(r) dr \right] \times \left[\int_{R_x}^{X' - \frac{\sqrt{2}W}{2}} r \left(2\pi - 4 \arccos \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} \right) I(r) dr + \int_{X' - \frac{\sqrt{2}W}{2}}^{X' + \frac{\sqrt{2}W}{2}} 2r \left(\frac{\pi}{4} + \arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} \right) I(r) dr + \int_{X' + \frac{\sqrt{2}W}{2}}^{R_d} 2r \left(\arcsin \frac{\sqrt{2} X' + W}{2r} + \arcsin \frac{\sqrt{2} X' - W}{2r} \right) I(r) dr + \int_{X' + \frac{\sqrt{2}W}{2}}^{R_d} 4r \left(\frac{\pi}{4} - \arcsin \frac{\sqrt{2} X' + W}{2r} \right) I(r) dr \right]^{-1}. \quad (9)$$

当 $R_d - \sqrt{2}W/2 < X'$ 时, 如图 6(f) 所示, 光斑完全偏离第三象限, 此时探测器失去检测能力。

3.2 性能分析

结合(4)式和(6)~(9)式, 理论分析了环形光斑偏移量与 QD 输出信号之间的关系。取 $k=1, I_0=1$, 环形光斑内外圆的半径分别为 $R_x=0.3 \text{ mm}, R_d=1 \text{ mm}$, 死区宽度 $W=0.1 \text{ mm}$; 取完整光斑的半径 $R=$

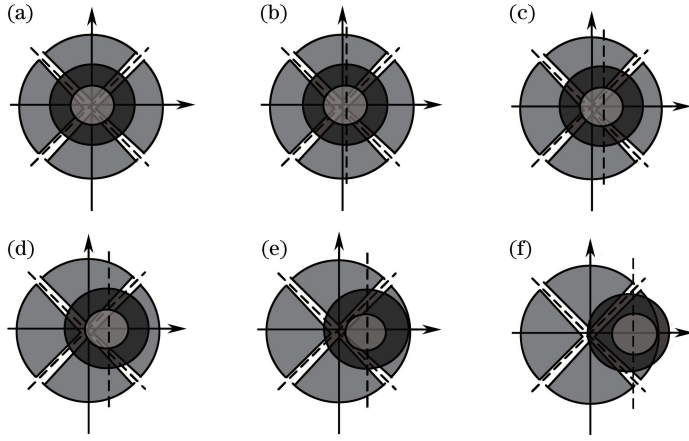


图 6 QD 环形光斑能量分布图。(a)光束已对准;(b) $0 < |X'| < \sqrt{2}W/2$; (c) $\sqrt{2}W/2 < |X'| < R_x - \sqrt{2}W/2$;
(d) $R_x - \sqrt{2}W/2 < X' < R_x + \sqrt{2}W/2$; (e) $R_x + \sqrt{2}W/2 < X' < R_d - \sqrt{2}W/2$; (f) $R_d - \sqrt{2}W/2 < X'$

Fig. 6 Annular facula energy distributions of QD. (a) Beam has been aligned; (b) $0 < |X'| < \sqrt{2}W/2$;
(c) $\sqrt{2}W/2 < |X'| < R_x - \sqrt{2}W/2$; (d) $R_x - \sqrt{2}W/2 < X' < R_x + \sqrt{2}W/2$;
(e) $R_x + \sqrt{2}W/2 < X' < R_d - \sqrt{2}W/2$; (f) $R_d - \sqrt{2}W/2 < X'$

1 mm, 死区宽度 $W=0.1$ mm。由图 3(a)可知,光斑能量呈高斯分布,光能量在光斑中心附近处最强。与完整光斑相比,副镜遮挡导致探测器接收光能量损失较大。

图 7(a)为探测器死区存在的条件下,目标光斑偏移量随光斑中心坐标 X' 的变化曲线图。相比完整光斑,环形光斑偏移量的计算出现误差。完整光斑的探测线性区间为 $-0.6 \sim 0.6$ mm,而环形光斑的探测区间则减小到 $-0.3 \sim 0.3$ mm。由图 7(b)可知,与完整光斑相比,环形光斑探测线性区域的检测灵敏度降低。以上分析说明环形光斑的探测线性区间和灵敏度会受卡式光学天线副镜遮挡的影响而减小和降低。

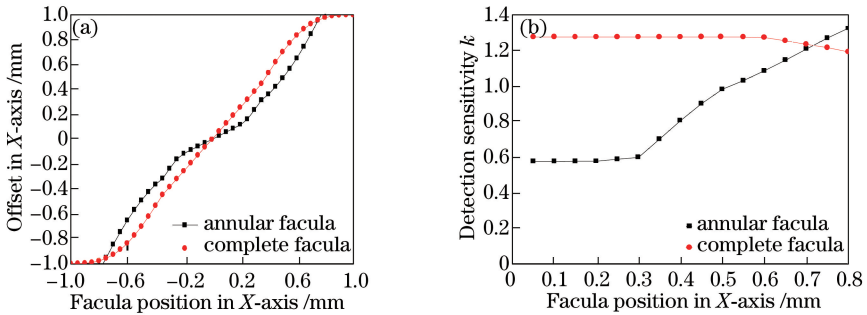


图 7 环形光斑与完整光斑算法的误差分析。(a) X 轴输出结果与实际光斑位置;(b)检测灵敏度

Fig. 7 Error analysis of annular facula and complete facula algorithms. (a) X-axis output results and position of actual facula; (b) detection sensitivity

图 8 为在接收到的光斑半径不发生变化(R_d 不变)的条件下,选择不同遮光比的卡式光学天线(R_x 变化)时目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X' 变化的曲线图。取 $R_d=1$ mm,对 R_x 分别为 0.2,0.3,0.4,0.5 mm 4 种情况进行分析。由图 8 可知,当环形光斑中心位置在 X 轴方向偏移时,结合图 6,光斑中心遮挡处未完全离开第三象限之前,卡式天线遮光比对光斑探测线性范围和灵敏度的影响较小。光斑继续偏移,光斑中心遮挡完全偏离第三象限但未完全进入第一象限时,受死区、副镜遮挡和光斑半径多种因素的影响,QD 的检测值发生严重的脉冲变化,非线性误差很大。但当遮光比为 30%时,非线性误差减小,探测器的探测线性范围增大,可以结合光斑尺寸选择合适的卡式光学天线。

图 9 为实验时选定卡式光学天线(R_x 不变)、改变光斑半径(R_d 变化)时,目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X' 变化的曲线图。取 $R_x=0.3$ mm,对 $R_d=1.0,0.8,1.2$ mm 三种情况进行分析。由图可知, $R_d=1.0$ mm(遮光比为 30%)时探测器的探测线性范围最大,可以在卡式光学天线主副镜大小确定的情况下选择合适的光斑半径。

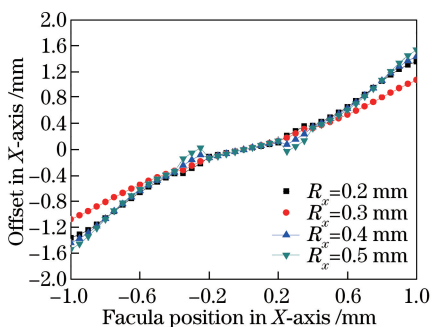


图 8 $R_d=1$ mm 时目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X' 的变化

Fig. 8 Variation in target facula offset x with facula center coordinate X' when $R_d=1$ mm

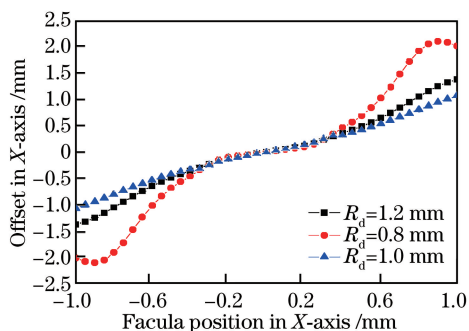


图 9 $R_x=0.3$ mm 时目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X' 的变化

Fig. 9 Variation in target facula offset x with facula center coordinate X' when $R_x=0.3$ mm

4 环形光斑误差补偿法

精跟踪视场出现光斑时,光束横向漂移和天线视轴与光轴角度误差导致光斑残缺,且光斑偏离 QD 坐标原点位置。利用高精度两轴伺服转台与光束对准检测系统配合克服漂移和角度误差。

在相同实验条件下,利用 QD 采集完整环形光斑的总能量。排除背景光影响并确定激光器输出光功率时,可以得到稳定范围的判定阈值,进行统计平均并取判定阈值 N 。接着进行螺旋路径扫描,利用探测器对各象限光能量的总和进行数据采集和阈值判断。扫描过程中,光能量的总和在确定帧数内保持大于阈值 N ,即认为克服了光束漂移误差,发送停止扫描指令给伺服转台。如图 10(a)所示,此时探测器光敏面上的光斑是完整但偏离探测器坐标原点的环形光斑。

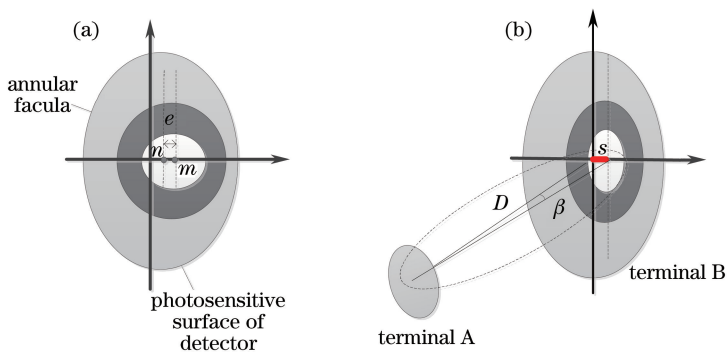


图 10 补偿算法示意图。(a)补偿值;(b)补偿角度误差

Fig. 10 Schematic of compensation algorithm. (a) Compensation value; (b) compensation of angle error

在角度对准实验中,QD 作为控制系统闭环回路中的反馈传感器,反馈探测信息给上位机(PC),解算位置偏移量和角度误差值,控制器控制伺服系统进行光斑对准微角度调节。在图 10(b)中的虚线内, D 为两终端之间光束的传播距离, s 为探测器上实际偏移量的直线距离,当 $D \gg s$ 时,可以近似认为 s 为图 10(b)中角度误差 β 所对应的弧长,其中 β 可表示为

$$\beta = \frac{180s}{\pi D} \tag{10}$$

将 s 细分为探测器可以探测到的最小移动间距 L (探测器细分能力)的整数倍 Z ,再将 β 分为 Z 份,每份的角度值为 ϕ ,使伺服系统每次调节都转动角度值 ϕ ,在调节过程中搜索光斑中心位置。

由图 5 可知,光斑中心能量的缺失导致 QD 检测光斑的位置偏移量存在误差,为了获得实际偏移量 s ,需要对环形光斑的检测值进行误差补偿。图 10(a)中, m 、 n 分别为环形光斑的实际中心和检测中心,则

$$s = |n| + e, \tag{11}$$

式中 e 为需要计算的环形光斑误差补偿值。环形光斑中心光能量缺失带来的与实际偏移量之间的横向误差为环形光斑与完整光斑检测值之间的纵向误差,可表示为

$$e = |F \tan \theta| - |f|, \quad (12)$$

式中 F 是环形光斑的实际偏移量, f 是实验时采样得到的环形光斑检测偏移量。实验前对探测器在完整光斑下(X 轴的情况)的探测性能进行分析,确定其可探测的线性范围并对其线性区间进行曲线拟合,除去偏离拟合曲线较远的数据点, $\tan \theta$ 的表达式为

$$\tan \theta = \frac{x'}{X''}, \quad (13)$$

式中 x' 是完整光斑偏移量检测值, X'' 是给定偏移量。由图 8、9 可知,即使受多种因素的影响,探测器坐标原点附近也会有一定范围的可探测线性区间,探测器探测环形光斑线性区间的检测值与实际值之间的线性关系为

$$\tan \alpha = \frac{y'}{Y''}, \quad (14)$$

式中 y' 是环形光斑偏移量检测值, Y'' 是给定偏移量。对于完整光斑而言,得到光斑偏移量检测值即可根据线性关系得到实际的偏移量。环形光斑的曲线和线性关系是在误差存在的情况下测得的,当得到偏移量检测值时,通过线性关系得到实际偏移量也是存在误差的。因此实际偏移量不能直接计算得到,需要进行补偿值计算。

在角度对准实验中,数据的采样速率较高,获得定点时刻内在线性区间中探测器检测偏移量的平均值 $\sum_{i=1}^n (f_i/n)$,以防止以某个检测值计算时出现意外偏离线性区间的数据点。环形光斑的实际偏移量计算表达式为

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i/n)}{\tan \alpha}. \quad (15)$$

5 实验研究

5.1 实验系统搭建及探测器检测过程验证

选用口径为 203 mm、中心副镜直径为 40 mm 的光学天线;选用中国电子科技集团公司第四十四研究所生产的 QD,其光敏面半径为 2 mm,死区宽度为 0.1 mm,响应时间为 6 ns,暗电流为 12 nA,响应度为 0.45,激光器波段为 650 nm;APT 伺服系统选择两轴高精度伺服电机。在实验中,对 QD 输出信息进行放大、模数(A/D)转换及滤波去噪优化,并采取措施克服背景光及光束漂移误差等影响探测器探测精度的因素。通过先进精简指令集微处理器(ARM)进行运算,求解光斑位置,利用计算机进行实时数据采集并控制伺服转台转向,以进行光轴对准。搭建的实验系统平台如图 11 所示。

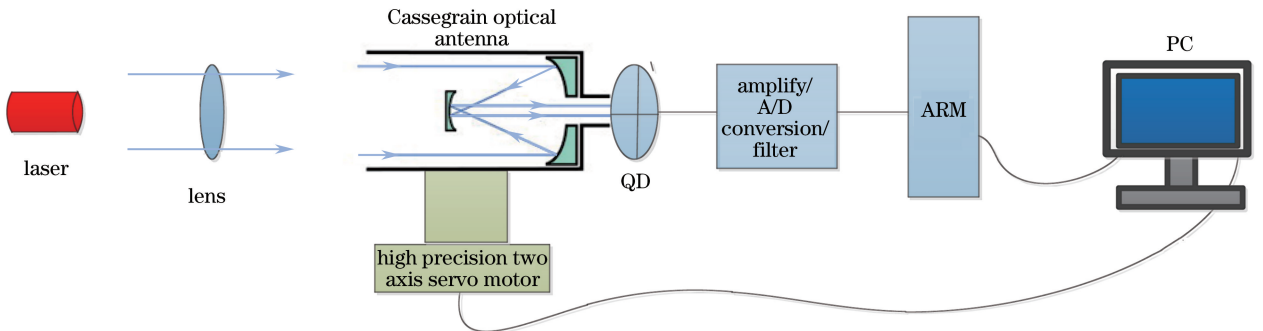


图 11 实验系统示意图

Fig. 11 Diagram of experimental system

图 12(a)为克服光束漂移误差时,伺服系统进行螺旋扫描的路径图;图 12(b)为螺旋扫描过程中从残缺光斑到完整光斑的输出光能量总和过程图。根据实验数据对 2000 帧数据进行统计平均并取粗跟踪阈值 $M=2.2358$,精跟踪视场出现光斑。若在 80 帧内探测器测得的 4 个象限能量总和大于 M ,即认为可以进行

精跟踪调节。接着进行螺旋扫描,以搜索完整环形光斑,由图 12(b)可知,搜索过程中探测器输出值不断增加,进行统计平均并取阈值 $N=6.2124$ 。若在 20 帧以内探测器测得的能量均大于阈值 N ,即认为此时搜索到完整光斑。由图 12 可见,与完整圆形光斑相比,副镜遮挡下的完整环形光斑有较大的能量损失。

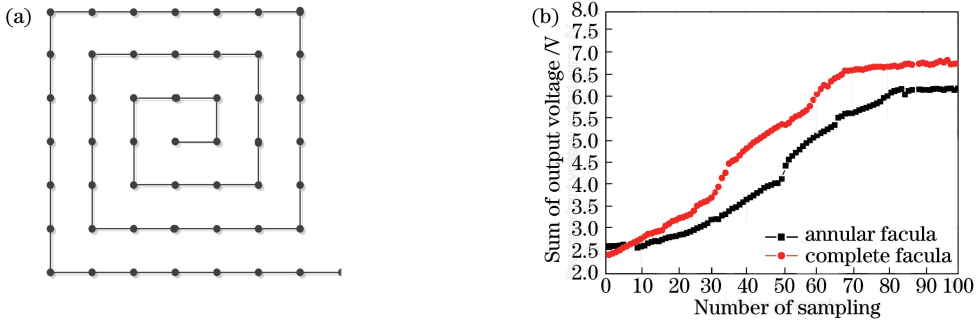


图 12 光斑搜索过程示意图。(a)螺旋扫描路径图;(b)扫描过程输出数据图
Fig. 12 Schematic of facula search process. (a) Path of helical scanning;
(b) output data of scanning process

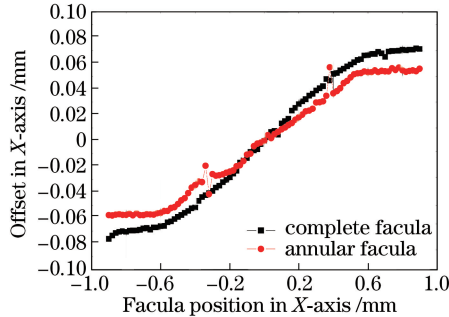


图 13 遮光比确定时目标光斑偏移量 x 随光斑中心坐标 X' 变化的实测数据图
Fig. 13 Measured data of variation in target facula offset x with facula center coordinate X' when shading ratio is determined

在光斑遮光比为 20% 时进行完整光斑和环形光斑的实验测试,计算得到比例系数 $k=10$,环形光斑外圆半径取光敏面的一半,即 $R_d=1\text{ mm}$ 。由图 13 可知,环形光斑、完整光斑的探测线性范围分别为 $-0.3\sim 0.3\text{ mm}$ 和 $-0.55\sim 0.55\text{ mm}$,探测范围变小,且检测灵敏度降低。由于受中心遮挡、死区和光斑半径等多重因素的影响,光斑在 X 轴方向偏移的过程中,QD 的检测值出现非线性误差,因此需要选择合适的遮光比来改善影响因素带来的误差,使其与数学模型的分析结果一致。

5.2 环形光斑误差补偿算法验证

为了验证环形光斑误差补偿算法的正确性,进行了定点检测光斑位置偏移量实验。将 QD 以 45° 安装在二维微位移转台上,多次测量完整光斑下各象限的输出值,调整转台使得光斑中心与坐标中心重合,并使完整光斑和环形光斑的位置在探测器探测线性区间内向 X 轴正向偏移一定距离,解算后完整光斑偏移量分别为 $0.078, 0.159, 0.183, 0.202\text{ mm}$,之后均保持收发两端固定。环形光斑位置偏移量检测结果之一如图 14 所示,前 300 帧和后 300 帧数据是补偿前后环形光斑中心位置的偏移量,两者之间存在误差。数据的波动和误差是由外部电磁干扰和电路噪声等因素引起的。

为了验证环形光斑误差补偿算法的正确性,实验中的实际偏移量已知,实验结果如表 1 所示。由表 1 可知,补偿后环形光斑的实际偏移量与完整光斑基本相同,但是噪声和近似计算等因素的影响使得环形光斑偏移量并不能得到完全补偿,并且补偿误差随着环形光斑偏移量的增大而增大,补偿的准确度降低,这是因为光束边缘处能量低于中心处,随着光斑远离探测器的中心位置,信号信噪比下降。实验前后光斑性质一致性越好,环形光斑误差补偿的准确度越高。

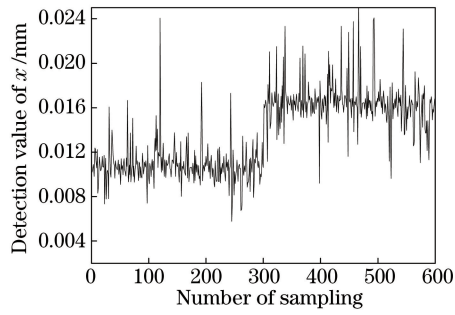


图 14 环形光斑位置偏移量检测结果

Fig. 14 Detection value of position offset of annular facula

表 1 环形光斑误差值补偿过程计算

Table 1 Compensation process calculation of annular facula error value

| Annular facula detection value /mm | Complete facula slope ($\tan \theta$) | Annular facula slope ($\tan \alpha$) | F /mm | e /mm | s /mm | Actual angle error / μ rad |
|------------------------------------|---|--|---------|---------|---------|--------------------------------|
| 0.052 | 1.267 | 0.883 | 0.059 | 0.023 | 0.082 | 16.4 |
| 0.102 | | | 0.116 | 0.044 | 0.161 | 32.1 |
| 0.121 | | | 0.137 | 0.053 | 0.190 | 38.1 |
| 0.136 | | | 0.154 | 0.059 | 0.213 | 42.6 |

对所采集的数据进行线性拟合,计算得到环形光斑和完整光斑下线性区域的斜率分别为 0.9890 和 1.1816,如表 2 所示。根据(10)~(15)式计算环形光斑线性区域 0.35 mm 内的 X 轴偏移量补偿值 e ,逐步补偿部分值,如表 2 所示。解算俯仰和方位角度值,驱动伺服系统以调节光斑位置。在实验室环境下模拟系统实验过程,截取的光斑位于中心位置后的 300 个采样点内,如图 15 所示,由于不受大气湍流等干扰因素的影响,在信噪比大小合适的情况下 x 检测值的波动较小,探测器中心检测精度为 0.0015 mm。

表 2 环形光斑偏移量补偿值 e

Table 2 Offset compensation value e of annular facula

| Offset /mm | Detection value /mm | e /mm |
|------------|---------------------|---------|
| 0.02 | 0.0023 | 0.0004 |
| 0.04 | 0.0021 | 0.0046 |
| 0.06 | 0.0052 | 0.0024 |
| 0.08 | 0.0040 | 0.0007 |
| 0.10 | 0.0088 | 0.0046 |
| 0.12 | 0.0102 | 0.0050 |
| 0.14 | 0.0121 | 0.0052 |
| 0.16 | 0.0136 | 0.0097 |
| 0.18 | 0.0162 | 0.0093 |
| 0.20 | 0.0181 | 0.0103 |
| 0.22 | 0.0202 | 0.0102 |
| 0.24 | 0.0228 | 0.0094 |
| 0.26 | 0.0233 | 0.0116 |
| 0.28 | 0.0247 | 0.0106 |
| 0.30 | 0.0297 | 0.0092 |

6 结 论

深入分析了空间激光通信中使用卡式光学天线时在 QD 光敏面上形成环形光斑所带来的探测器检测误差以及探测器探测线性范围减小和灵敏度降低的问题。研究表明:通过选择合适的卡式天线或光斑半径,可

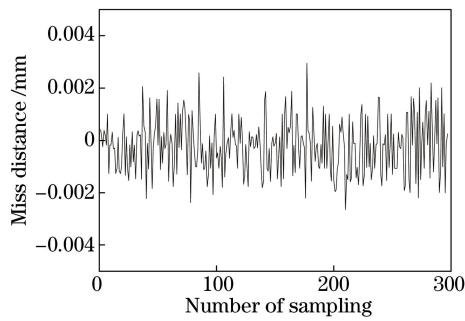


图 15 精对准光斑脱靶量

Fig. 15 Miss distance of facula in fine tracking

使遮光比为 30% 左右时探测器的探测线性范围最大,非线性误差减小;选择死区宽度尽可能小的探测器可最大限度地减少光能量损失;采用所提环形光斑误差补偿算法对偏移值进行补偿时,探测器探测精度可达 0.0015 mm。此研究最大限度地接近实验条件,为 APT 系统中的环形光斑探测及误差补偿提供了理论依据。

参 考 文 献

- [1] Sun Quanshe, Zhao Facai, Chen Kunfeng, *et al.* Design of off-axis optical antenna for space optical communications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2501-2505.
孙权社, 赵发财, 陈坤峰, 等. 空间激光通信系统离轴天线设计研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(8): 2501-2505.
- [2] Jin Guang, Li Yanjie, Zhong Xing, *et al.* Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2067-2074.
金光, 李艳杰, 钟兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2067-2074.
- [3] Zhang Tao, Fu Qiang, Jiang Huilin, *et al.* Effects of transmitting and receiving energy efficiency on the performance of co-focal reflective type laser communication networking antenna system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(12): 1206002.
张涛, 付强, 姜会林, 等. 能量收发效率对共焦点反射式光通信组网天线系统性能的影响[J]. *光学学报*, 2016, 36(12): 1206002.
- [4] Ke Xizheng, Lei Sichen, Wang Tianyu. Cassegrain transceiver antenna based on fiber array[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 120602.
柯熙政, 雷思琛, 王天瑜. 基于光纤阵列的卡塞格伦收发一体天线[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 120602.
- [5] Liu Yunqing, Jiang Huilin, Tong Shoufeng. Study on stabilizational tracking technology for atmospheric laser communication system[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(5): 0505005.
刘云清, 姜会林, 佟首峰. 大气激光通信中稳定跟踪器件及算法研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0505005.
- [6] Lee E J, Park Y, Kim C S, *et al.* Detection sensitivity of the optical beam deflection method characterized with the optical spot size on the detector[J]. *Current Applied Physics*, 2010, 10(3): 834-837.
- [7] Gu Ye, Tong Shoufeng, Song Yansong, *et al.* Performance research on four-quadrant detector in communications and tracking compound mode[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(s1): s114002.
谷野, 佟首峰, 宋延嵩, 等. 四象限探测器在通信与跟踪复用模式下的性能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(s1): s114002.
- [8] Zhao Xin, Niu Junpo, Liu Yunqing, *et al.* Laser communication/ranging integrated technology and link characteristics in navigation satellite system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 060601.
赵馨, 牛俊坡, 刘云清, 等. 导航卫星中激光通信/测距一体化技术及链路特性分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 060601.
- [9] Zhang Lei, Zhang Guoyu, Liu Yunqing. Affecting factor for detection accuracy of four-quadrant detector[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(6): 0605007.
张雷, 张国玉, 刘云清. 影响四象限探测器探测精度的因素[J]. *中国激光*, 2012, 39(6): 0605007.
- [10] Schmidt C, Horwath J. Wide-field-of-regard pointing, acquisition and tracking-system for small laser communication terminals[C]. *Proceedings of ICSOS*, 2012.

- [11] Yang Guishuan, Zhang Zhifeng, Zhai Yusheng, *et al.* Study on influence of dead zone on detection range and sensitivity four-quadrant detector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062303.
杨桂栓, 张志峰, 翟玉生, 等. 死区对四象限探测器探测范围和灵敏度影响的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 062303.
- [12] Ma Xiaojun, Wang Bing, Yang Huajun, *et al.* Optimum design for Cassegrain optical system[J]. *Laser and Infrared*, 2014, 44(4): 410-413.
马晓军, 王冰, 杨华军, 等. Cassegrain 光学天线系统的优化设计[J]. *激光与红外*, 2014, 44(4): 410-413.
- [13] Zhang Hui, Chen Yunshan, Geng Tianwen, *et al.* Study on main factors affecting position detection accuracy of four-quadrant detector[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(12): 1217002.
张辉, 陈云善, 耿天文, 等. 四象限探测器位置检测精度的主要影响因素研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(12): 1217002.
- [14] Ke Xizheng, Lei Sichen, Yang Peisong. Beam coaxial alignment detection in atmospheric laser communication [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(6): 0606003.
柯熙政, 雷思琛, 杨沛松. 大气激光通信光束同轴对准检测方法[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0606003.
- [15] Ke Xizheng, Li Shiyan. Experimental study on optical axis alignment of the optical antennas under the spot broken[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 0406002.
柯熙政, 李世艳. 光斑缺碎情形下光学天线光轴对准实验研究[J]. *光子学报*, 2017, 46(4): 0406002.
- [16] Tang Yanqin, Gu Guohua, Qian Weixian, *et al.* Laser spot center location algorithm of four-quadrant detector based on Gauss distribution[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 57-63.
唐彦琴, 顾国华, 钱惟贤, 等. 四象限探测器基于高斯分布的激光光斑中心定位算法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 57-63.
- [17] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, *et al.* Study four-quadrant detector in the free space laser communication[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(8): 2030-2034.
韩成, 白宝兴, 杨华民, 等. 自由空间激光通信四象限探测器性能研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(8): 2030-2034.
- [18] Lu Ning, Ke Xizheng, Zhang Hua. Research on APT coarse tracking in free-space laser communication[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 943-949.
卢宁, 柯熙政, 张华. 自由空间激光通信中 APT 粗跟踪研究[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(5): 943-949.
- [19] Hao X, Kuang C F, Ku Y L, *et al.* A quadrant detector based laser alignment method with higher sensitivity[J]. *Optik*, 2012, 123(24): 2238-2240.